

DOI: 10.5846/stxb201805311198

董雪, 辛智鸣, 黄雅茹, 李新乐, 郝玉光, 刘芳, 刘明虎, 李炜. 乌兰布和沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征. 生态学报, 2019, 39(17): - .
Dong X, Xin Z M, Huang Y R, Li X L, Hao Y G, Liu F, Liu M H, Li W. Soil stoichiometry in typical shrub communities in the ulan buh desert. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): - .

乌兰布和沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征

董 雪, 辛智鸣*, 黄雅茹, 李新乐, 郝玉光, 刘芳, 刘明虎, 李 炜

中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位监测研究站, 磴口 015200

摘要: 乌兰布和沙漠不同典型灌木群落类型对荒漠土壤质量的改善具有重要的作用, 而土壤碳、氮、磷生态化学计量比是体现生态系统变化过程的重要依据。研究不同灌木植被类型对土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征的影响, 对于深入认识乌兰布和沙漠典型灌木植被生长与修复对土壤质量的改良, 准确评价植被生态环境效益具有重要的现实意义。在乌兰布和沙漠 8 个主要建群种天然植被类型灌木林地内设置 10m×10m 的标准样方进行调查, 在灌丛边缘(东、南、西、北四个方向)进行土壤分层采样, 取样深度分别为 0—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm, 共 5 层。将相同层次土壤样品充分混合, 经四分法取样, 风干, 过 0.15 mm 筛用于土壤 C、N、P 含量的测量, 分析不同灌木类型各土层碳、氮、磷含量及其生态化学计量比的垂直分布特征, 探寻各指标间的相关关系。结果表明: 乌兰布和沙漠地区 8 种天然灌木林地土壤有机 C、全 N、全 P 含量整体水平不高, 分别为 2.45、0.26、0.28 g/kg, 均低于全国水平。由 C、N、P 含量的相关性分析可知三者间呈显著正相关 ($P < 0.05$), 且 C、N 元素含量变化几乎同步, 但 P 元素含量变化滞后于二者。各灌木类型表层(0—20cm)土壤 C、N、P 含量均较高, 各灌木类型土壤有机 C、全 N 含量随着土壤深度的增加呈下降趋势, 而不同灌木类型土壤全 P 含量从上至下分布规律不同, 且土层对 P 含量无显著差异 ($P > 0.05$)。8 种典型灌木群落土壤整体 C:N、C:P、N:P 值(9.41、8.70、0.93)低于全国水平, 各灌木类型土壤 N:P 和 C:P 随土壤深度而递减, 但不同灌木类型土壤 C:N 随土层深度的变化规律不同。乌兰布和沙漠典型灌木群落土壤碳、氮、磷化学计量特征值均低于全国水平, 各灌木类型土壤 C、N、N:P 和 C:P 随土壤深度而递减, 但不同灌木类型土壤 P、C:N 随土层深度的变化规律不同。有机 C、全 N、全 P 与其化学计量比之间具有非线性耦合关系。C:N 和 P 含量具有较高的稳定性 ($CV = 22.45\%$ 和 24.39%), C:P 和 N:P 比值是研究区限制性养分判断的重要指标。

关键词: 土壤化学计量特征; 荒漠植物; 土层深度; 乌兰布和沙漠

Soil stoichiometry in typical shrub communities in the ulan buh desert

DONG Xue, XIN Zhiming*, HUANG Yaru, LI Xinle, HAO Yugang, LIU Fang, LIU Minghu, LI Wei

Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy Forestry, Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem Research Station, State Forestry and Grassland Administration Dengkou 015200, China

Abstract: Different typical shrub communities have made an important contributions to alleviating the problem of soil degradation in the Ulan Buh Desert. Shrub type plays an essential role in ecosystem recovery and affects soil quality, particularly the contents of carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P). In recent years, stoichiometry has been successfully used to indicate community succession and vegetation restoration, and studies on the effects of different shrub types on soil C, N, and P stoichiometry have contributed to our understanding of the relationships between vegetation restoration and soil quality, and are also beneficial with regards to determining the processes and functions of ecological systems. In this study, standard sampling plots of 10 m × 10 m were established in shrub woodland of Ulan Buh Desert natural vegetation types, and soil stratified sampling was carried out in the marginal sections (east, south, west, and north

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2017MA027-1, CAFYBB2018QA007, IDS2017JY-1); 国家自然科学基金基金项目(31600581)

收稿日期: 2018-05-31; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xzmlkn@163.com

directions) of plant shrubs, with sampling depths being divided into five layers: 0—20, 20—40, 40—60, 60—80, and 80—100 cm. Soil samples collected from the same levels were mixed, dried, and passed through a 0.15mm sieve, and subsequently analyzed using the four-point method to determine the contents of C, N, and P in soil. The soil organic C, total N, and total P contents in the 0-100 cm layer of soil were measured and ecological stoichiometric characteristics in different shrubs and soil depths were compared. Correlations between indicators were also determined. The results showed that the mean contents of soil C, N, and P were 2.45, 0.26, and 0.28 g/kg, respectively, which were all below the national levels. In all the four soils, there was a moderate variation in the stoichiometric characteristics of C and P, whereas there was a relatively marked variation in soil N. Correlation analysis of the elements showed extremely significant correlations between C and N, C and P ($P < 0.01$), and N and P ($P < 0.05$). Furthermore, C and N showed almost synchronous variation, whereas P invariably showed a lag. The contents of soil C, N, and P in the surface layer (0-20 cm) of soil associated with each shrub type were higher than those in deeper soil. The ratios of both soil C and N decreased significantly with increasing soil depth, whereas the vertical pattern of soil P differed from top to bottom. There was no significant difference in the P content of different soil layers ($P > 0.05$). The mean soil C:N, C:P, and N:P ratios were 9.41, 8.70, and 0.93, respectively, which were all below the national level. Soil C and N contents and N:P and C:P ratios decreased significantly with increasing soil depth, whereas the vertical pattern of soil P and the C:N ratio differed from top to bottom. The soil organic C, total N, and total P and the stoichiometric ratios of the typical shrub community in the Ulan Buh desert were found to have a non-linear coupling relationship. The soil C:N ratio and P content have high stability ($CV = 22.45\%$ and 24.39% , respectively), whereas the C:P and N:P ratios are important indicators for determining nutrient limitation.

Key Words: Soil stoichiometry; Desert plant; Soil depth; Ulan Buh Desert

生态化学计量学主要研究生态过程中化学元素含量和元素比例关系及其对环境因子响应的变化规律^[1],广泛应用于植物个体生长、种群动态、群落演替、生态系统稳定性以及限制元素判断等研究领域。土壤是植物赖以生存与修复的重要物质基础,土壤中的 C、N、P 元素是保障生态系统健康及养分循环的重要生态因子,三个元素含量的动态平衡及其化学计量特征直接影响着土壤肥力和植物的生产力^[2-4]。因此,研究碳氮磷化学元素在生态系统过程中的共变规律和耦合关系,对于揭示生态系统过程影响因素、平衡循环机制及其作用机制具有重要意义^[5-7]。从土壤化学计量学角度揭示不同荒漠植被类型生态系统土壤内部 C、N、P 平衡和循环过程,能为我国荒漠生态系统土壤养分平衡和循环研究提供基础数据及理论指导。

荒漠化是当今世界面临的重大土地退化问题,并且平均每年以 3.4% 的面积在递增,荒漠又是陆地生态系统的重要组成部分之一,中国荒漠化土地面积约占国土总面积的 17.9%^[8]。荒漠生态系统由于降水稀少,蒸发量大而引起气候干燥、植被稀少、环境荒凉,造成生态系统极其脆弱,且修复困难^[9]。土壤碳氮磷计量比特征能广泛地指示群落的生态学动态过程,土壤养分状况与植物的生长与修复密切相关,土壤-植物相互作用与碳氮磷循环的耦合关系,对于深入认识和保护荒漠生态系统具有重要而深远的意义。灌木作为干旱、半干旱荒漠区植物群落的主要建群种和基础资源,对于减轻自然侵蚀、遏制荒漠化的进展、保护自然环境和维系干旱荒漠区生态环境稳定具有重要保障作用^[10]。然而,荒漠地区土壤的化学计量学研究相对滞后于植物器官的研究,这严重限制了土壤-植物分布关系和养分循环的动态研究发展。基于此,本研究在对乌兰布和沙漠优势灌木群落土壤有机 C、全 N、全 P 含量调查分析的基础上,通过研究不同灌木群落间的土壤养分垂直分布状况及其生态化学计量比,探讨土壤碳氮磷含量之间及其生态化学计量比之间的相互关系,评价不同植被类型下土壤的生态化学计量特征,预测乌兰布和沙漠植被群落、生态系统结构与稳定性的演变趋势,以期对荒漠土地承载力评价、土壤-植物养分关系及荒漠植被修复提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

乌兰布和沙漠是中国八大沙漠之一,位于内蒙古自治区阿拉善盟阿拉善左旗和巴彦淖尔市磴口县 2 个旗县境内,地理区域为东经 $106^{\circ}09'-106^{\circ}57'$,北纬 $39^{\circ}16'-40^{\circ}57'$ 之间。该区属于中温带干旱性气候,年均降水量 110—160mm,年均蒸发量 2400—3200mm,是降水量的 20 倍多;年均气温 $7.5-8.5^{\circ}\text{C}$,年平均风速 3.5m/s ,常见风力 3—5 级,主风方向为东南风或偏南风,年日照总时数 3000h 以上。气候干旱少雨,昼夜温差大,季风强劲,沙尘暴灾害性天气较频繁^[11]。土壤类型以风沙土为主,沙漠南部多流沙,中部多垄岗形沙丘,北部多固定和半固定沙丘。调查统计乌兰布和沙漠共有天然植物 455 种,属于 56 科 208 属。荒漠植被是维系干旱荒漠区生态环境稳定的重要保障,其植被组成中灌木是植物群落的主要建群种。旱生灌木是治理荒漠化的有效物种,也是干旱荒漠区生态环境恢复中至关重要的基础资源。

1.2 试验方法

于 2016 年 7 月下旬实地考察中,采用考察沿线记录与典型样地调查相结合的方法(科考路线见图 1)。在乌兰布和沙漠 8 个主要建群种(白刺、沙冬青、梭梭、霸王、红砂、油蒿、沙拐枣、驼绒藜)天然植被类型灌木林地内设置 $10\text{m}\times 10\text{m}$ 的标准样方,实测并记录每个样方内植物种名、株数、高度、冠幅和盖度等指标,样地情况见表 1。在灌丛边缘(东、南、西、北四个方向)进行土壤分层采样,取样深度分别为 0—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm,共 5 层。将相同层次多点取样土壤样品充分混合,除去植物根系、动植物残体及大的石块,装入样品袋低温保鲜运回实验室,经四分法取样,风干,过 0.15mm 筛用于土壤 C、N、P 含量的测量。采用重铬酸钾外加热法测定有机 C 含量;经 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 法消煮后,用凯氏定氮法测定全 N 含量;经 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{HClO}_4$ 法消煮后,用钼锑抗比色法测定全 P 含量^[12]。

1.3 数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 软件对数据进行统计分析,土壤 C:N、C:P、N:P 化学计量比采用质量比表示,通过单因素方差分析(One-Way ANOVA)的 LSD 法对不同灌木类型和同一灌木类型不同土层土壤间各元素含量及其化学计量比进行显著性检验,且采用多因素方法对两者的交互作用进行统计学分析,选择线性函数、二次函数、幂函数、指数函数、对数函数等多种函数模型对 72 个样地土壤 C、N、P 含量及其化学计量比进行最优拟合。表中数据为平均值 $\pm$ 标准差。

2 结果与分析

2.1 不同灌木群落类型 0—100cm 土壤化学计量特征

乌兰布和沙漠 8 种典型荒漠灌木群落样地 0—100 cm 土壤 C、N、P 含量为 5 个土层的平均值 $\pm$ 标准误分别为 $2.45\pm 1.06\text{ g/kg}$ 、 $0.26\pm 0.09\text{ g/kg}$ 、 $0.28\pm 0.07\text{ g/kg}$,土壤 C:N、C:P、N:P 平均值分别为 9.41 ± 2.12 、 8.70 ± 3.18 、 0.93 ± 0.30 (表 2)。土壤 C:N 的变异系数最小仅为 22.50%,其次是全 P 含量,变异系数为 24.39%,两者

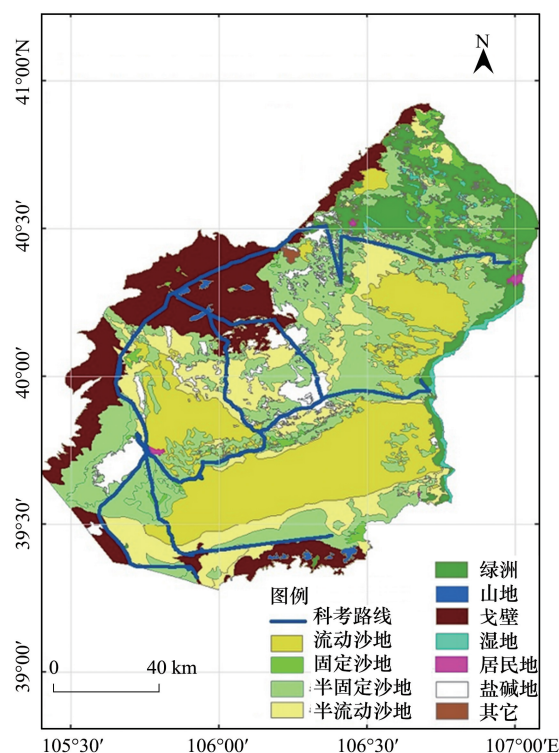


图 1 乌兰布和沙漠植被调查路线

Fig.1 Investigation Route of Ulan Buh Desert Vegetation

均属于弱变异 ($CV < 25\%$)。其余 4 个指标为中等变异,其变异系数范围 31.80%—43.44%,以土壤有机 C 含量变异为最高。土壤养分化学计量特征在不同群落类型间有差异 ($P < 0.05$)。驼绒藜群落具有最高的土壤 C、N 含量,且显著高于其他灌木群落 ($P < 0.05$),而油蒿群落最低。土壤 P 含量以霸王群落为最高,但其与沙冬青群落、梭梭群落和白刺群落均未达到显著水平 ($P > 0.05$),油蒿群落土壤 P 含量最低,且显著低于其他灌木群落 ($P < 0.05$)。土壤 C:P 和 N:P 均以驼绒藜群落最高,分别为 13.41 ± 3.38 和 1.52 ± 0.29 ,而以霸王群落最低,分别为 4.89 ± 0.82 和 0.54 ± 0.03 。除红砂和油蒿群落外,不同植被类型对土壤 C:P 的影响均达到了显著水平 ($P < 0.05$),除沙拐枣和梭梭群落外,不同植被类型对土壤 N:P 的影响均达到了显著水平 ($P < 0.05$),但是不同植被类型对土壤 C:N 的影响相对较小。土壤 C:N 以沙拐枣群落最高,比值为 13.08 ± 1.64 ,但其与沙冬青、梭梭和红砂群落土壤 C:N 比均未达到显著水平 ($P > 0.05$)。土壤 C:N 以油蒿群落最低,比值为 6.28 ± 1.14 ,但其与驼绒藜、霸王和白刺群落土壤 C:N 比均未达到显著水平 ($P > 0.05$)。

表 1 典型灌木群落样地植被特征

Table 1 Typical Shrub Community Sample Area and the Characteristics of Vegetation

群落类型 Community type	样方个数 The Nnumber of quadrat	植被总盖度/% Vegetation coverage	高度 Height/cm	冠幅面积 The crown area/m ²	物种数 Species number	主要伴生物种 Associated species
驼绒藜	7	30%—40%	42.39±5.98	0.36±0.12	16±3.65	骆驼蓬、猫头刺、虫实、猪毛菜、蒺藜、沙葱、画眉草、沙生针茅
沙冬青	12	25%—35%	118.23±19.65	9.51±1.89	12±3.68	白刺、霸王、梭梭、油蒿、骆驼蓬、芨芨草、虫实、沙米
沙拐枣	6	20%—30%	81.96±5.63	0.50±0.23	10±1.96	霸王、油蒿、驼绒藜、虫实、猪毛菜、沙葱
梭梭	10	25%—35%	198.36±35.61	6.52±2.16	7±2.14	白刺、沙冬青、霸王、红砂、沙拐枣、沙米、虫实
霸王	7	20%—30%	68.98±12.58	2.15±0.65	5±1.11	油蒿、骆驼蓬、五星蒿、猪毛菜、沙米
白刺	15	20%—30%	48.84±18.69	9.47±3.69	8±2.28	梭梭、红砂、沙竹、沙米、虫实、画眉草、五星蒿、猪毛菜
红砂	6	15%—25%	32.15±5.98	0.22±0.09	5±1.39	泡泡刺、盐爪爪、五星蒿、珍珠柴
油蒿	9	30%—40%	49.56±7.16	0.39±0.11	5±1.25	沙竹、沙米、虫实、五星蒿、猪毛菜

驼绒藜 *Ceratoides latens*、沙冬青 *Ammopiptanthus mongolicus*、沙拐枣 *Calligonum mongolicum*、梭梭 *Haloxylon ammodendron*、霸王 *Sarcosyium xanthoxylon* Bunge、白刺 *Nitraria tangutorum*、红砂 *Reaumuria soongorica*、油蒿 *Artemisia ordosica*、泡泡刺 *Nitraria sphaerocarpa*、盐爪爪 *Kalidium foliatum*、骆驼蓬 *Peganum harmala*、猫头刺 *Oxytropis aciphylla*、虫实 *Corispermum hyssopifolium*、猪毛菜 *Salsola collina*、蒺藜 *Tribulus terrestris*、沙葱 *Allium mongolicum*、画眉草 *Eragrostis pilosa*、沙生针茅 *Stipa capillata*、五星蒿 *Bassia dasyphylla*、珍珠柴 *Salsola passerina* Bunge、沙竹 *Psammochloa villosa*、沙米 *Agriophyllum squarrosum*

表 2 乌兰布和沙漠 8 种典型灌木群落 0—100cm 土层土壤化学计量特征

Table 2 The Characteristics of Soil Stoichiometry in the Soil Layer of the Typical Shrub Community in Ulan Buh Desert

植被类型 Different communities	土壤有机 C Soil organic carbon	土壤全 N Soil total nitrogen	土壤全 P Soil total phosphorus	土壤 C:N Soil C/N Ratio	土壤 C:P Soil C/P Ratio	土壤 N:P Soil N/P Ratio
驼绒藜	3.92±1.75a	0.44±0.17a	0.28±0.06b	8.76±0.61b	13.41±3.38a	1.52±0.29a
沙冬青	3.36±1.07b	0.32±0.08b	0.32±0.06a	10.51±0.89a	10.64±1.76c	1.01±0.10c
沙拐枣	3.35±0.93b	0.26±0.04c	0.27±0.03b	13.08±1.64a	12.22±2.18b	0.93±0.06d
梭梭	2.91±0.72c	0.29±0.07bc	0.31±0.02a	10.24±1.22a	9.34±2.02d	0.92±0.18d
霸王	1.89±0.45d	0.21±0.02d	0.38±0.03a	8.96±1.13b	4.89±0.82g	0.54±0.03g
白刺	1.58±0.79de	0.22±0.09d	0.29±0.07ab	7.20±0.86b	5.50±1.59f	0.76±0.15e
红砂	1.58±0.54de	0.15±0.04e	0.23±0.04c	10.25±1.17a	6.92±1.23e	0.68±0.05f
油蒿	1.00±0.31e	0.16±0.08e	0.15±0.01d	6.28±1.14b	6.69±1.48e	1.07±0.41b
平均值 Mean	2.45±1.06	0.26±0.09	0.28±0.07	9.41±2.12	8.703±3.18	0.93±0.30
变异系数 Coefficient of variation%	43.44	36.67	24.39	22.50	36.51	31.80

表中土壤化学计量特征结果为 0—100cm 土层以 20cm 土层为间隔共计 5 个土层的平均值;同一列中不同小写字母表示各指标在不同灌木群落之间的差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 不同灌木群落类型 0—100cm 土层化学计量特征垂直分布特征

由图 2 可以看出, 乌兰布和沙漠 8 种典型荒漠灌木 0—100 cm 土壤的有机 C、全 N 含量随不同土层深度的增加呈现逐渐降低的趋势, 且土壤有机 C、全 N 含量在 0—60 cm 范围内锐减, 在 60 cm 以下缓慢降低并趋于稳定。从土壤剖面来看, 表层 0—20 cm 土层, 不同植被群落类型对土壤有机 C 和全 N 的影响均达到显著水平 ($P < 0.05$), 驼绒藜群落土壤有机 C 和全 N 含量均显著大于其他 7 个群落, 其中表层土壤有机 C 含量最大, 为 6.15g/kg, 油蒿群落最低, 为 1.42g/kg。对 8 种典型灌木群落而言, 同一植被类型土壤全 P 在 0—100 cm 各土层间差异不显著, 且各灌木群落类型从上到下分布规律不一致。驼绒藜、沙冬青、沙拐枣、红砂土壤中全 P 含量随土层深度的增加呈降低趋势, 而梭梭、霸王、白刺、油蒿土壤中全 P 含量随着土层深度减小或者不变。分析比较不同灌木类型同层间的土壤 P 含量, 红砂和油蒿群落土壤全 P 含量与其他 6 种灌木群落达到显著水平, 而其余 6 种灌木群落之间的差异均不显著。不同灌木类型土壤 C:N 比值随着土层加深的变化规律不一致, 梭梭和油蒿群落 60—80 cm 土层 C:N 值最高, 其余各灌木类型土壤 0—20 cm 层 C:N 值最大, 其比值范围在 9.46—14.27 之间。8 种典型灌木群落的土壤 N:P 和 C:P 都随着土壤剖面土层深度的增加呈减小趋势, 其比值变化范围分别在 4.07—17.07 和 0.53—1.81 之间, 且垂直递减的速率比 C:N 较快。不同灌木类型、不同土层深度之间土壤 N:P 和 C:P 的差异显著 ($P < 0.05$)。不同灌木类型土壤 C:N 之间差异性显著 ($P < 0.05$), 但同一灌木类型不同土层间 C:N 差异不显著 ($P > 0.05$)。

通过多变量因素分析植被类型、土壤深度及两者的交互作用对化学计量特征值 6 个指标的整体影响结果显示 (见表 3), 植被类型、土壤深度分别对 6 个指标的综合影响达到了显著水平 ($P < 0.01$), 而植被类型与土壤深度的交互作用对土壤化学计量特征值的 6 个指标的整体影响未达到显著水平 ($P > 0.05$)。

表 3 植被类型、土壤深度对土壤化学计量特征 6 个指标的整体影响

Table 3 The effects of vegetation type and soil depth on soil stoichiometric characteristics

	植被类型 Vegetation Type	土壤深度 Soil Depth	植被类型×土壤深度 Types×Depths
<i>F</i>	27.698	69.368	1.264
<i>P</i>	0.000	0.000	0.109

2.3 荒漠灌木群落土壤化学计量特征间的关系

荒漠灌木群落土壤有机 C、全 N、全 P 含量之间均存在一定的耦合关系 (图 3)。土壤有机 C 含量与全 N 含量之间为极显著的二次函数关系 ($R^2 = 0.8427, P < 0.01$), 土壤有机 C 与全 P 含量及土壤全 N 与全 P 之间为显著的幂函数关系 ($P < 0.05$), 其相关系数较低 ($R^2 = 0.4874$ 及 0.4208)。土壤 N 含量随有机 C 含量的增加显著增大, 而 P 含量相对稳定, 且变化滞后于土壤碳、氮, 三者间均表现出不同的非线性协变关系。土壤 C:P 与 N:P 呈极显著的幂函数关系 ($R^2 = 0.6731, P < 0.01$), 但 C:N 与 C:P 和 N:P 之间没有显著的相关关系 (图 3)。由图 4 可知, 土壤化学计量比与土壤有机 C 之间均具有极显著的二次函数关系 ($P < 0.01$), 但与土壤全 P 之间没有明显的相关关系 ($P > 0.05$)。土壤全 N 含量与土壤 C:P 和 N:P 具有极显著的二次函数关系 ($P < 0.01$), 但与土壤 C:N 之间没有明显的相关关系 ($P > 0.05$)。C:P 随 C 含量的增加先增加后降低, 而随 N 的增加显著上升。此外, 不同化学计量比的主要控制元素也各不相同, 土壤 C:N 与有机 C 含量拟合模型的相关系数 (0.4593) 高于 N 含量 (0.1315), 故土壤有机 C 含量对 C:N 的影响更大; C:P 的主要受 C 含量的影响 ($R^2 = 0.4905$), P 含量的影响较弱 ($R^2 = 0.1791$); N:P 的主要受 N 含量的影响 ($R^2 = 0.6528$), P 含量的影响较弱 ($R^2 = 0.0269$)。碳氮磷化学计量比中, C:N 和 N:P 的变异系数相对较大 (表 2), 但却都与 C 含量呈现极为密切的二次函数关系。可见, 荒漠土壤有机 C、全 N 和全 P 含量与其化学计量比之间具有较复杂的非线性关系, 而非简单的线性关系。

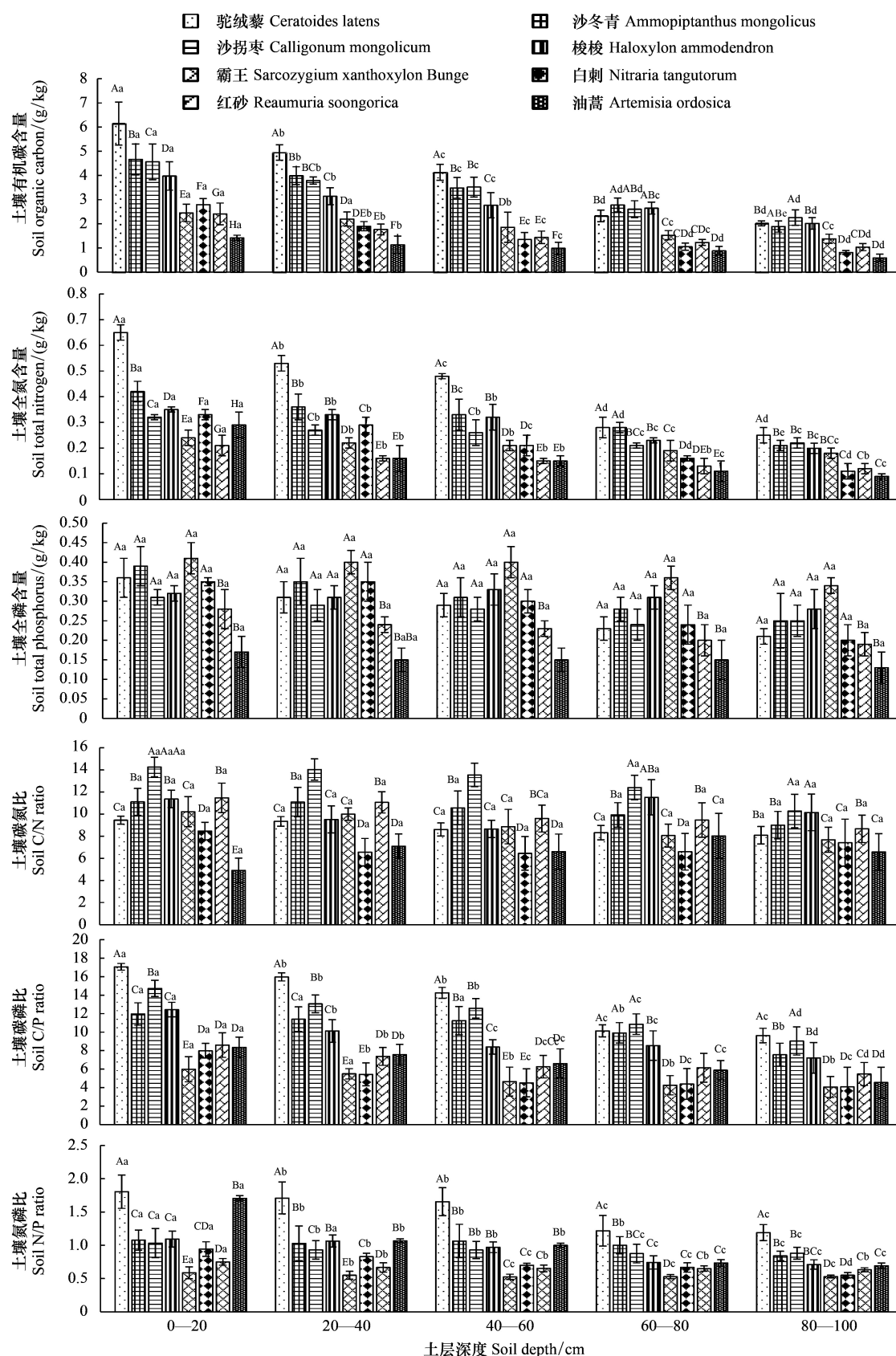


图2 不同灌木类型土壤化学计量特征的垂直分布变化

Fig.2 Vertical Distribution of Soil Stoichiometric Characteristics Under Different Shrub Types

不同大写字母表示同一土层不同典型群落之间的显著性差异 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示同一典型群落不同土层之间的显著性差异 ($P < 0.05$)

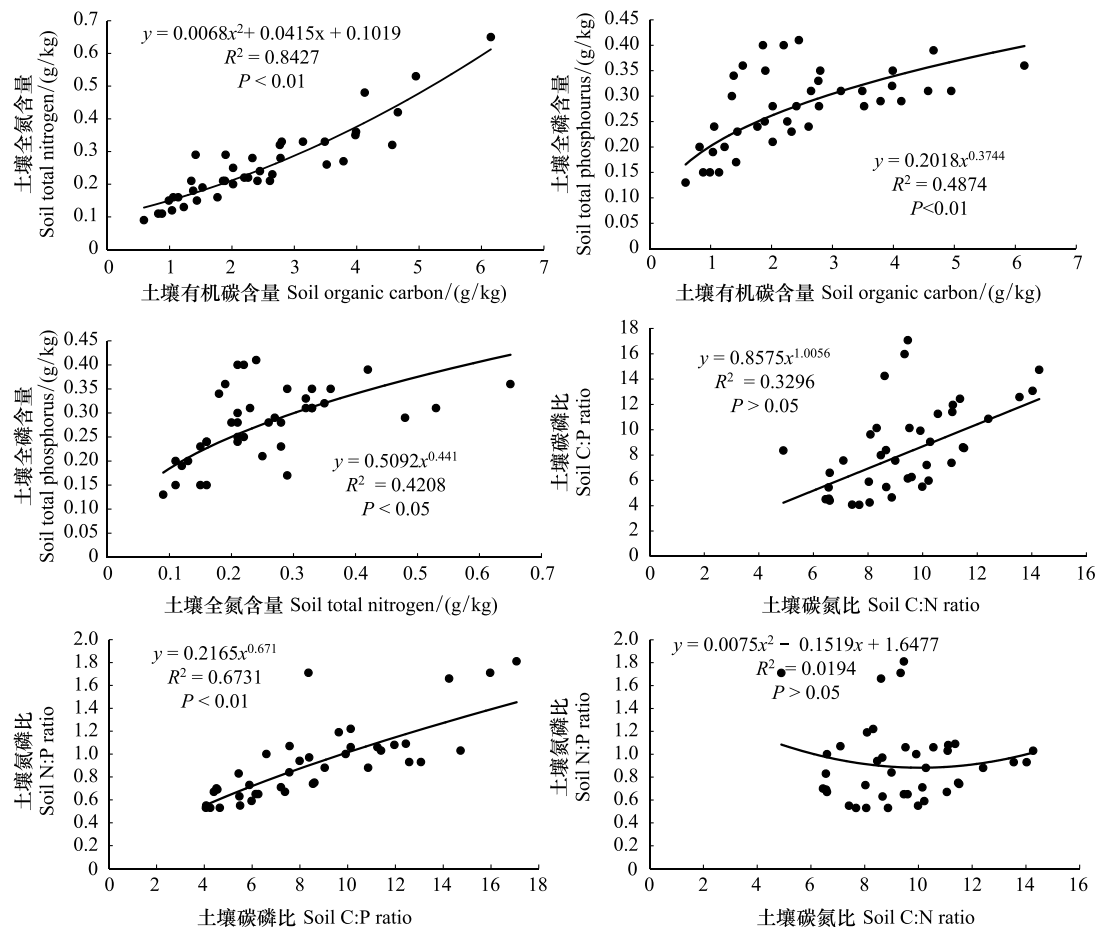


图3 荒漠灌木群落土壤化学计量特征之间的关系

Fig.3 Relationship Among Soil Stoichiometric in Typical Desert Shrub Communities

3 讨论

研究表明,由于以不同类型灌木为建群种的荒漠植被群落其伴生的物种也不同,因此各灌木群落多样性和丰富度均有差别,造成不同群落的生物量、地表凋落物的组成及分解速率等均存在一定差异,从而造成不同植被类型灌木林地土壤养分化学计量特征有显著差异^[13],我们对乌兰布和沙漠分布的典型荒漠灌木类型的研究结果与其类似。此外,不同灌木群落根系活动深度不同,对土壤养分的吸收强度和深度也不同,从而在对土壤养分垂直分布特征的影响强度上存在差异^[14]。本研究结果得出,乌兰布和沙漠8种典型灌木群落土壤整体的有机C、全N、全P三元素含量较低(2.45、0.26和0.28g/kg)远低于全国(11.12、1.06和0.65g/kg)水平^[15,16],可知乌兰布和沙漠典型灌木群落土壤C、N、P元素极为贫瘠。土壤有机C和全N主要来源于土壤有机质、凋落物的分解和根系分泌物,受环境和植被类型的影响较大^[17,18]。由于荒漠区干旱少雨,环境恶劣,植物群落形成的凋落物相对较少,致使输送到土壤中的凋落物分解合成的有机质含量较低^[19,20],因此造成土壤有机C、全N含量相对偏低。而土壤全P是一种沉积性物质,受成土母质的影响,主要来源于岩石分化且不利于迁移^[21],因此乌兰布和沙漠8种典型灌木土壤全P含量随着土层深度的增加,差异性逐渐减弱,而造成表层土壤磷含量差异较大的主要影响因素是植被类型^[22]。土壤C:N、C:P和N:P能很好地指示土壤养分状况^[23],本研究灌木群落土壤整体C:N、C:P、N:P值(9.41、8.70、0.93)低于全国水平(12.01、25.77、2.15)^[15,20]。乌兰布和沙漠8种典型灌木群落同一植被类型下各层土壤的C:N差异不显著且比较稳定,说明碳、氮作为结构性成分,在积累和消耗过程中具有相对固定的比值,且对环境变化的响应具有一致性^[24]。但

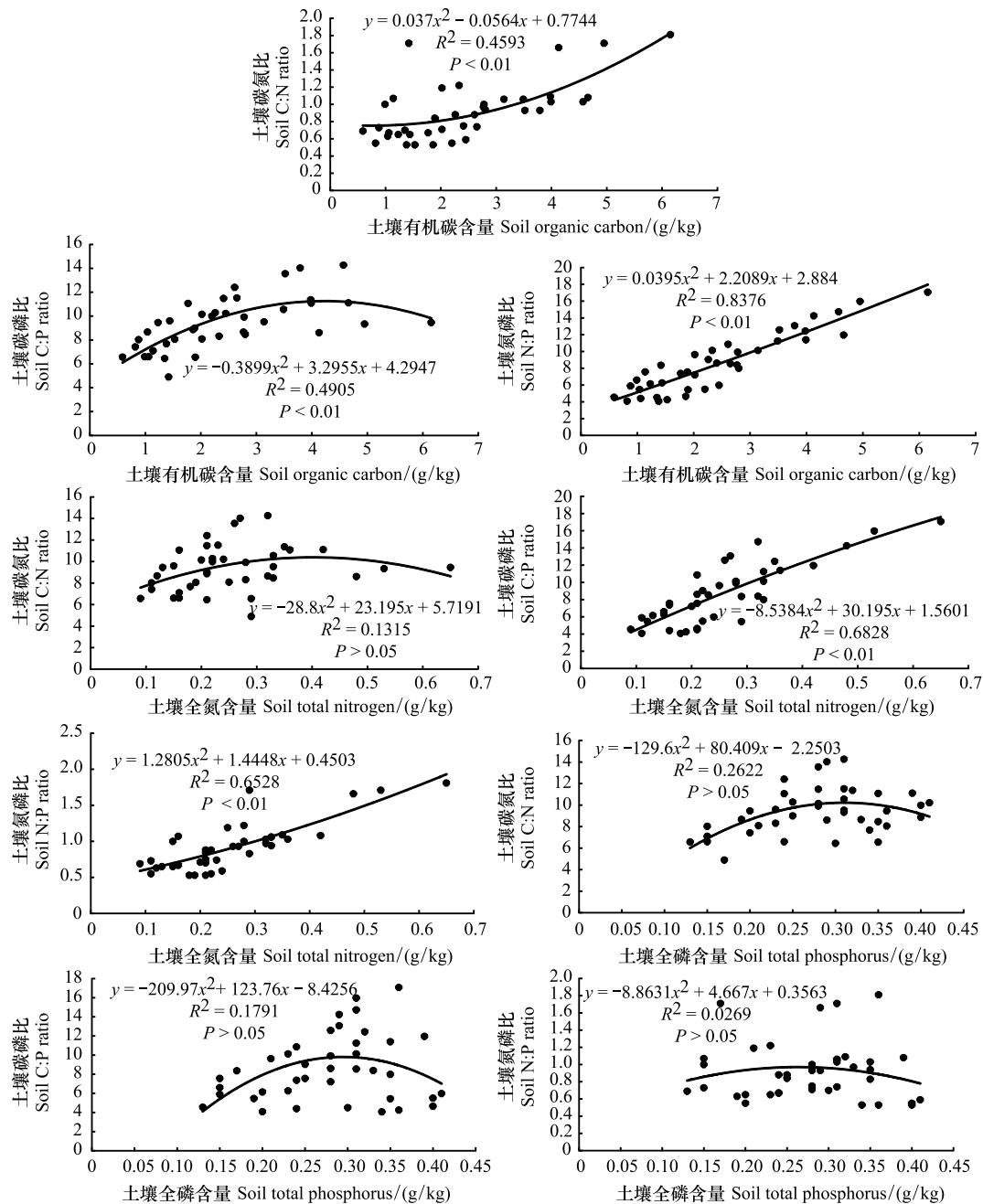


图4 荒漠灌木群落土壤化学计量比分别与 C、N、P 之间的关系

Fig.4 Relationship Between Soil C、N、P Contents and Their Stoichiometric Ratios in Typical Desert Shrub Communities

研究发现, 乌兰布和沙漠不同典型灌木群落土壤 C:P 和 N:P 变化较大, 植被类型造成土壤 C:P 和 N:P 的差异, 主要是由于不同植物对土壤、大气中主要化学元素的吸收和释放不同, 从而导致不同植被类型下土壤 C:P 和 N:P 值的差异^[2,25]。由此推断土壤 C:P 和 N:P 可以作为乌兰布和荒漠地区指示磷有效性和限制性养分判断的重要指标, 其化学计量比值大小可以预测该地区土壤-植被群落的生态系统结构与稳定性的演变趋势。

在干旱、半干旱荒漠生态系统中, 由于风蚀作用强烈, 风力搬运、水土流失、降尘频发以及灌木植物对土壤结构和土壤微环境的改变, 使得灌丛边缘土壤养分富集表现出“沃岛效应”现象比较典型^[26,27]。研究表明乌兰布和沙漠 8 种典型灌木土壤有机 C 和全 N 含量均随土层深度的增加而下降。可能是因为荒漠地区土壤表

层较为疏松, 土壤透气性较好, 表层土壤氧气充足, 使其微生物活动比较活跃, 易于植物凋落物的分解、腐殖质的积累和土壤养分的截存和富集, 呈现一定的“沃岛效应”现象。土壤 C、N、P 元素作为影响植物正常生长发育所必需的养分, 在植物生长过程中发挥着重要的作用, 其含量的多少及成分组合状况, 均会受到植被种类和外界环境的影响^[28, 29]。本研究 0—20cm 土层有机 C、全 N 在不同群落类型之间形成显著的差异 ($P < 0.05$), 表明不同灌木种类, 由于植株形态结构、凋落物和根分泌物的不同, 造成土壤养分含量存在明显的差异, 另一方面灌丛形成后对周围土壤的肥力亦有明显的富集和保护作用, 0—20cm 土层土壤全 P 含量高于下层土壤, 但相对比较稳定, 土层对其影响未达到显著水平。相关性分析表明, 乌兰布和沙漠典型灌木群落土壤有机 C、全 N、全 P 彼此之间存在显著的正相关 ($P < 0.05$), 土壤的碳、氮、磷三个元素的关系紧密, 互相作用形成了一定的耦合关系。土壤有机 C 与全 N 的相关系数最高达 0.843, 说明土壤中碳、氮含量对地表植被类型及环境因子的响应是一致的, 荒漠区不同灌木类型的土壤 C:N 比较稳定, 变异性最小。

乌兰布和沙漠典型灌木群落土壤表层 C、N 和 P 含量高于下层土壤, 这可能由于土壤有机 C 和全 N 主要来源植物残体 (凋落物和根系分泌物), 随着土壤深度增加, 有机质输入的能力会下降, 土壤有机 C、全 N 含量随土层深度的增加逐渐减小。土壤 P 含量除了源于有机质输入外, 母岩风化过程会不断补充下层土壤 P 含量, 使土壤 P 含量的垂直递减速率要远慢于土壤 C 和 N 含量, 导致土壤 P 具有相对稳定的垂直分布, 变异性较小。研究区土壤碳氮磷计量比随土层深度的变化格局表现为: 8 种典型灌木类型 (除梭梭和油蒿群落外) 土壤 C:N 随土层深度逐渐递减, 各灌木群落土壤 N:P 和 C:P 均随着土壤深度呈急剧减小趋势, 且垂直递减的速率比 C:N 快, 此研究结果与许多学者^[30-32]的研究结果类似。由于气候、植被、土壤类型均会影响 C:N, 且影响力在土层深度间也存在差异, 但随着土壤深度增加, 通常气象因子 (降水、温度等) 和植被因子对土壤 C:N 的影响力相对减弱, 而土壤类型的影响力逐渐增强^[31, 33]。此外, 由于 C、N 养分的土壤剖面分布规律在不同植被类型间存在显著差异, 植被动态变化将会改变土壤 C:N 的垂直分布规律, 从而导致 C:N 随土层深度呈现复杂的变化规律。

4 结论

本文通过分析乌兰布和沙漠 8 种典型灌木类型区土壤的碳、氮、磷及其生态化学计量学特征, 探讨了养分含量及其生态化学计量比之间的相互关系, 得出以下结论:

(1) 土壤有机 C 和全 N 受土层和植被类型的影响, 而土壤全 P 主要受土壤母质的影响。各灌木类型土壤有机 C、全 N、全 P 含量均表现为表层土壤大于下层土壤, 不同灌木类型表层 0—20cm 土壤有机 C 和全 N 含量差异显著 ($P < 0.05$), 全 P 随土层深度变化差异性不显著 ($P > 0.05$)。各灌木群落土壤 C、N 含量随着土壤深度的增加均呈减少趋势, 但各灌木类型土壤 P 含量随着土层增加变化规律不一致。

(2) 不同植被类型对土壤生态化学计量比的影响程度不同。土壤 C:N 较为稳定, 变异系数最小, C:P、N:P 受植被类型影响较大, 随着土壤深度的增加, 各灌木群落土壤 C:P、N:P 均有所下降, 但土壤 C:N 在不同群落中变化规律不一致。因此土壤 C:P 与 N:P 可以作为评价该区域磷有效性和养分限制性的指标。

(3) 土壤碳、氮、磷含量及其化学计量比之间存在非线性耦合关系, 土壤有机 C 含量与全 N 含量之间为极显著的二次函数关系 ($P < 0.01$), 土壤有机 C 与全 P 含量及土壤全 N 与全 P 含量之间为显著的幂函数关系 ($P < 0.05$)。C、N 元素含量变化几乎同步, 但 P 元素含量变化滞后于二者。土壤化学计量比与土壤有机 C 之间均具有极显著的二次函数关系 ($P < 0.01$), 但与土壤全 P 之间没有明显的相关关系 ($P > 0.05$)。土壤全 N 含量与土壤 C:P 和 N:P 具有极显著的二次函数关系 ($P < 0.01$), 但与土壤 C:N 之间没有明显的相关关系 ($P > 0.05$)。因此, 乌兰布和沙漠典型灌木群落土壤有机 C、全 N、全 P 与其化学计量比之间具有复杂的非线性耦合关系。

在沙漠恶劣的自然环境下, 荒漠灌丛为了适应贫瘠的沙质环境, 需要提高养分的有效利用率, 从而形成了灌丛的“沃岛效应”, 研究不同灌木植物类型对土壤化学计量特征的影响, 对揭示灌木对荒漠系统中土壤养

分的保护和有效利用机制,以及植被的演替和恢复重建等都有重要的生态学意义。本研究对荒漠典型灌木类型对土壤养分的利用和保护效应进行了研究,初步揭示了灌木植物对土壤养分的利用对策和对土壤养分的截获和保护效应,可以为荒漠地区植被演替和重建以及土壤化学计量学研究提供基础科学依据。

参考文献 (References):

- [1] Shi S W, Peng C H, Wang M, Zhu Q A, Yang G, Yang Y Z, Xi T T, Zhang T L. A global meta-analysis of changes in soil carbon, nitrogen, phosphorus and sulfur, and stoichiometric shifts after forestation. *Plant and Soil*, 2016, 407(1/2): 323-340.
- [2] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [3] 王晓光. 中国北方草原东样带土壤与植物碳氮磷生态化学计量学研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [4] 唐高溶, 郑伟, 王祥, 朱亚琼, 吴燕锋. 喀纳斯景区山地草甸不同退化阶段群落共有种的生态化学计量特征研究. *草业学报*, 2016, 25(12): 63-75.
- [5] 方瑛, 安韶山, 马任甜. 云雾山不同恢复方式下草地植物与土壤的化学计量学特征. *应用生态学报*, 2017, 28(1): 80-88.
- [6] Li Y F, Liang S, Zhao Y Y, Li W B, Wang Y J. Machine learning for the prediction of *L. chinensis* carbon, nitrogen and phosphorus contents and understanding of mechanisms underlying grassland degradation. *Journal of Environmental Management*, 2017, 192: 116-123.
- [7] 李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰. 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征. *环境科学*, 2015, 36(8): 2988-2996.
- [8] 张元明, 王雪芹. 准噶尔荒漠生物结皮研究. 北京: 科学出版社, 2008.
- [9] Whitford W G. *Ecology of Desert Systems*. Amsterdam, Netherlands: Academic Press, 2002.
- [10] 孙儒泳, 李博, 诸葛阳, 尚玉昌. 普通生态学. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- [11] 吴鸿宾. 内蒙古自治区主要气象灾害分析: 1947—1987. 北京: 气象出版社, 1990.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] 陶冶, 吴甘霖, 刘耀斌, 张元明. 古尔班通古特沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征及其影响因素. *中国沙漠*, 2017, 37(2): 305-314.
- [14] 罗艳, 贡璐, 朱美玲, 安申群. 塔里木河上游荒漠区4种灌木植物叶片与土壤生态化学计量特征. *生态学报*, 2017, 37(24): 8326-8335.
- [15] 胡启武, 聂兰琴, 郑艳明, 吴琴, 尧波, 郑林. 沙化程度和林龄对湿地松叶片及林下土壤 C、N、P 化学计量特征影响. *生态学报*, 2014, 34(9): 2246-2255.
- [16] Li Y Q, Zhao X Y, Zhang F X, Awada T, Wang S K, Zhao H L, Zhang T H, Li Y L. Accumulation of soil organic carbon during natural restoration of desertified grassland in China's Horqin Sandy Land. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(3): 328-340.
- [17] 聂兰琴, 吴琴, 尧波, 付姗, 胡启武. 鄱阳湖湿地优势植物叶片凋落物-土壤碳氮磷化学计量特征. *生态学报*, 2016, 36(7): 1898-1906.
- [18] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 10-21.
- [19] 李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰. 黄土高原纬度梯度下草本植物生物量的变化及其氮、磷化学计量学特征. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(03): 743-751.
- [20] 张广帅, 邓浩俊, 杜锐, 林勇明, 马瑞丰, 俞伟, 王道杰, 吴承祯, 洪伟. 泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征——以云南省小江流域为例. *生态学报*, 2016, 36(3): 675-687.
- [21] Cheng M, An S S. Responses of soil nitrogen, phosphorous and organic matter to vegetation succession on the Loess Plateau of China. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(2): 216-223.
- [22] Bui E N, Henderson B L. C:N:P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors. *Plant and Soil*, 2013, 373(1/2): 553-568.
- [23] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 安韶山. 黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征. *自然资源学报*, 2016, 31(11): 1881-1891.
- [24] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: Is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252.
- [25] 王维奇, 曾从盛, 钟春棋, 仝川. 人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响. *环境科学*, 2010, 31(10): 2411-2416.
- [26] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, Cross A F. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology*, 1996, 77(2): 364-374.
- [27] 裴世芳, 傅华, 陈亚明, 李景斌. 放牧和围封下霸王灌丛对土壤肥力的影响. *中国沙漠*, 2004, 24(6): 763-767.
- [28] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 仝川, 张林海. 河口湿地植物活体—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征. *生态学报*, 2011, 31(23): 7119-7124.
- [29] McGroddy M E, Daufresne T, Hedin L O. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial Redfield-type ratios. *Ecology*, 2004, 85(9): 2390-2401.
- [30] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [31] Callesen I, Raulund-Rasmussen K, Westman C J. Nitrogen pools and C:N ratios in well-drained Nordic forest soils related to climate and soil texture. *Boreal Environment Research*, 2007, 12(6): 681-692.
- [32] Li H, Li J, He Y L, Li S J, Liang Z S, Peng C H, Polle A, Luo Z B. Changes in carbon, nutrients and stoichiometric relations under different soil depths, plant tissues and ages in black locust plantations. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, 35(10): 2951-2964.
- [33] Dawud S M, Raulund-Rasmussen K, Domisch T, Finér L, Jaroszewicz B, Vesterdal L. Is tree species diversity or species identity the more important driver of soil carbon stocks, C/N ratio, and pH? *Ecosystems*, 2016, 19(4): 654-660.